

水中爆発におけるガス球挙動 (第2報)

水槽壁の効果とガス球の沈下

田 中 一 三*

水中爆発のガス球脈動周期から、爆薬のガスエネルギーを測定する方法について、円筒形水槽内でこれを行ったときに生ずる壁の影響等がどのように現れるかを調べた。無限水中を仮定した通常の方法で、脈動周期からエネルギーを計算すると、発生するガス球の大きさに比して、水槽の深さが足りないとエネルギー値は小さく見積られ、水槽の断面積が小さいとエネルギー値は大きく見積られる傾向のあることを知った。またガス球挙動の無限水中との違いを示すガス球の沈下現象が、円筒形水槽内ではかなり著しく起ることを観察した。

1. 緒言

爆薬のエネルギー測定法として、最近水中爆発を利用する方法がよく用いられる。同じ目的を持った従来の方法(弾道臼砲、弾道振子等)が、定められた薬量の試験しか行えないのに対し、これは任意薬量の試験が行える利点を持っている。そのため、ブースターを必要とする爆薬をはじめ、大薬量の試験に適している。

水中爆発によるエネルギー測定では、衝撃波のエネルギーとガスのエネルギーを別々に求めることができる^{1),2)}。このうちガスエネルギーの測定は、前報³⁾に述べたように爆発ガス球の水中での脈動周期を測り、それから計算によってエネルギーを求めるものである。しかしエネルギー算出の基礎式は、無限水中でのガス球挙動から導かれたものを使うので、有限の大きさの水槽等で試験したときには、誤差を生ずるおそれがある。本報はこの点について検討を行ったものである。

実験には、東京工業試験所の敷地内に設けた二基の水槽を使用した。そして水面と底の関係、側壁の存在等が、ガス球脈動時の水の流れを制限して、ガスエネルギーの測定結果に与える影響を検討した。また無限水中のガス球挙動との差を最もよく表わす現象として、爆発ガス球の沈下があることを知り、それを観測した。

わが国では実験場の制約から、この種の試験を海で行うことができず、適当な水槽または池等を利用せざるを得ない。その際、本文のような研究を、あらかじめ行っておく必要があると思われた。

るを得ない。その際、本文のような研究を、あらかじめ行っておく必要があると思われた。

2. 測定法

実験に使用した水槽は Fig. 1 の2種類で、それぞれを以下、小水槽、大水槽と呼んで区別する。

水中での爆発ガス球の半径は、時間的に Fig. 2 のように変化する。その過程で水中には、最初の爆発時のほかに、ガス球が収縮した際にも圧力波が放射される。従って爆発から離れた位置で、これら圧力波の到達時間差を測定すれば、爆薬の爆発で膨脹したガス球

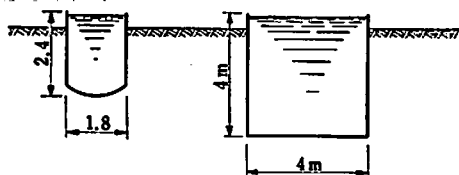


Fig. 1 Dimension of water vessels.

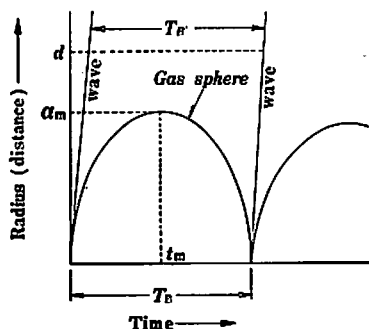


Fig. 2 Pulsation of gas sphere in water.

昭和54年2月7日受理

*東京工業試験所平塚分室 〒254 平塚市西八幡1-3-4

が収縮するまでの時間 T_B が求められる。 T_B を以下、ガス球の脈動周期と呼ぶ。脈動というのは、ガス球の膨脹収縮が何度もくり返されるところから来ているが、その間にガスはエネルギーを失って周期がだんだん短くなる。エネルギー測定では、 T_B は最初の一周期のみを考える。

その際、水中圧力波の検出を爆心から離れた点で行うことによる誤差は、次のように推定できる。

爆薬から測定点までの距離を d とすると、そこで得られる圧力波の時間差 T_B' は、実際の T_B との間に、

$$T_B' = T_B - (d/C_1) + (d/C_2) \quad (1)$$

の関係がある。ここに C_1 , C_2 はそれぞれ第1波、第2波の伝播速度である。第1波は衝撃波であり、第2波はほとんど弾性波なので $C_1 > C_2$ と考えられ、従って $T_B' - T_B$ だけの誤差が発生する。しかし実際の数値を入れてみると、それは極めて小さいことがわかる。

例えば極端な場合、第1波が圧力 5000bar の衝撃波とすると、 $C_1 = 2230\text{m/sec}$ ¹⁾、 $C_2 = 1460\text{m/sec}$ であるが、 $d = 1\text{m}$ として(1)式に代入すると T_B と T_B' の差は 0.18msec となる。(1)式中の C_1 は平均値であるから上の計算は非常に強力な爆薬の場合に生ずる誤差である。それに対して T_B の数値は、後に示すように雷管1本の爆発のみで 20msec 以上である。従って誤差の相対値で考えた場合は、0.1%以下に過ぎない。

水中圧力波の測定には、Kistler 社のピエゾゲージ 607A を直径 1 インチの鉄パイプの先端にとりつけたものを使った。爆源までの距離 d は、薬量に応じて 0.5~1m の範囲にとった。ピエゾゲージの出力は、Kistler 社のチャージアンプ 503 を介して、Ampex 社のデータレコーダー FR1300 に記録した。

圧力波は、第1波に関しては立上りの急峻な衝撃波であるが、第2波はガス球の収縮で圧力が高まった後、膨脹で低下するので、中央に最大値を持つような波形になる(後の Fig. 6 参照)。 T_B の読みとりは、第1波の立上りから、第2波の最大値までの時間とした。 T_B を精度良く読むために、第1波の立上りからディレイ T_1 をとったトリガーパルスにより第2波をオシロスコープ上に拡大し、その最大値までの時間 T_2 を読んで、 $T_B = T_1 + T_2$ とした。ディレイ装置は水晶発振器をクロックパルスに用いた自作の回路で、デジタルの遅延時間が設定できるものを用いた。 T_B の読み取りは、第2波のピークが丸味を帯びたものなので、0.05msec の単位にとどめた。

実験に使用した爆薬のうち、PETN はパラフィン を 20% 混入したプラスチック状のもので、本文中では単品と区別するため PP20 と呼ぶ。その他の爆薬、火工品については、必要があれば文中で説明した。

3. 水槽中のガスエネルギー測定

無限水中での爆発を仮定すれば、ガス球脈動周期 T_B と爆薬のガスエネルギー Y との間には、前報³⁾のように、

$$Y = 6.84 \times 10^7 \rho_0^{3/2} T_B^3 \quad (2)$$

の関係がある。ここに ρ_0 はガス球にかかる静水圧を bar 単位で表わしたもので、上式の T_B を sec 単位にとると Y は Joule 単位で得られる。 ρ_0 は爆心における静水圧とみなされるので、装薬水深を $D(\text{m})$ とすれば、

$$\rho_0 = (0.1D + 1) \quad (3)$$

に等しい。

上の関係は、 Y の等しい爆薬を爆発させても、水深 D が変われば ρ_0 が変化するので、 T_B は備かながら変化することを意味している。その場合 T_B の変化は、(2)式へ代入して Y を計算したときに一定となるように変化すべきである。一定値からのずれは、無限水中の仮定が崩れたためと考えれば、これから水槽の大きさの効果が具体的に示されるであろう。

Table 1 は、小水槽の中心軸上で、水深 D を変えて電気雷管を爆発させたときの T_B の値と、(2)式から計算した Y の値である。測定は 2 回ずつ行っているが、これから得られた Y は、 $D = 0.75 \sim 1.50\text{m}$ の範囲で 1.1kJ であり、浅いところおよび深いところではやや小さくなっている。

Table 1 Period of pulsation and calculated gas energy of electric detonators, fired at various depth.

Charge depth (m)	Hydrostatic pressure ρ_0 (bar)	Period of pulsation T_B (msec)	Energy of gas bubble Y (kJ)
0.25	1.025	22.35	0.81
		22.95	0.88
0.50	1.050	23.90	1.06
		24.05	1.08
0.75	1.075	23.75	1.10
		23.80	1.11
1.00	1.100	23.20	1.08
		23.30	1.10
1.25	1.125	23.00	1.12
		23.05	1.13
1.50	1.150	22.45	1.10
		22.50	1.11
1.75	1.175	21.55	1.03
		21.85	1.07
2.00	1.200	21.00	1.00
		21.00	1.00

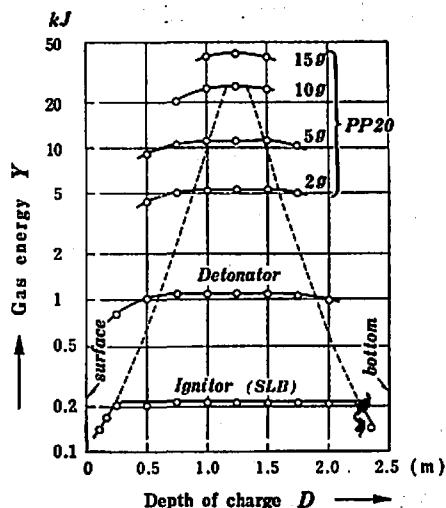


Fig. 3 Effect of charge depth.

同様の実験を、エネルギーの小さいコンクリート破砕器用の点火管 (SLB)、およびエネルギーの大きい爆薬を使って行った結果が、Fig. 3 に示されている。横軸は爆心の深さ D 、縦軸は(2)式による Y である。図からわかるように、エネルギーの大きい爆薬(火薬)ほど、一定エネルギーを与える水深領域がせまくなる。図にはその領域が2本の点線で示してある。そしてこの内側では、一応無限水中の仮定が成り立っていると考えれば、ここで実験した小水槽の場合、爆心の深さを水深の半分にとって測定したとして、正しい測定が行われうる薬量は PP20 の 10g 以下 (エネルギー 25kJ 以下) ということになる。

上の意味の最大許容エネルギーは、水槽の形状で定まる。それを求める最も簡単な方法は、装薬位置を一定にして同じ爆薬の薬量を変化させて測定してみることであろう。その際エネルギーをできるだけ正しく知るには、Fig. 3 からわかるように、装薬水深は水槽の深さの 1/2 が望ましい。そして T_B の測定値から Y を算出し、薬量 W との間に

$$Y = Y_0 + kW \quad (4)$$

の直線関係が成り立てばよい。ここに Y_0 は起爆に使用する雷管のみのエネルギーで、 k が供試爆薬 1g あたりのエネルギーである。

Fig. 1 に示した2基の水槽について、粉状 TNT を供試爆薬として上の実験を行った結果を Fig. 4 に示す。小水槽においては、(4)の直線関係からのずれが $W > 10g$ から起っているが、大水槽ではここに描いた $W = 30g$ までほぼ直線の範囲内にある (これより大きい薬量の実験は地震動が強く、周囲の事情から実施しなかった)。

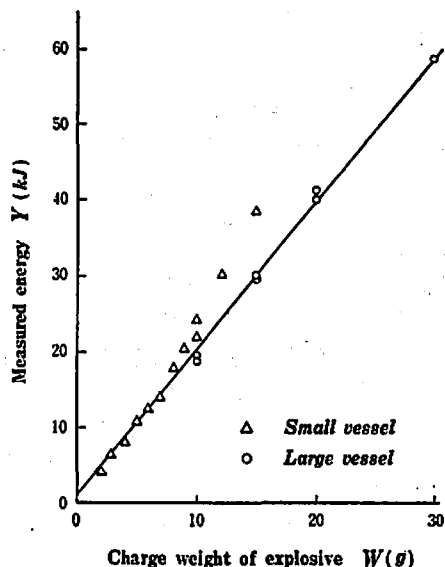


Fig. 4 Gas energy measurement in test vessels with increased charge weight.

Fig. 4 で小水槽の場合、許容値を越えた薬量の測定で Y は正規の値より大きく出る傾向にある。同様な実験で T_B を測って、小さく出る傾向の報告もあり⁷⁾、ずれの方向は一般的な傾向ではない (この点は次節で考察する)。

ここで二三の爆薬および火工品について、本文に述べた方法で測定したガスエネルギーの値を Table 2 に掲げておく。爆薬については、起爆に使った雷管のエネルギーを差引いた 1g あたりの値である。

ここで TNT については、無限水中に近い海中での

Table 2 Gas energy of explosives and accessories

Explosive	Y
TNT ($\rho_0=1.0$)	2.0 kJ/g
Tetryl ($\rho_0=1.6$)	2.1 "
PETN ($\rho_0=1.0$)	2.6 "
PP 20 ($\rho_0=1.6$)*	2.1 "
PSB ($\rho_0=0.6$)**	1.3 "
Pb-tricinate	0.91 "
Detonation fuse (fat)	30 kJ/m
Detonation fuse (thin)	21 "
Electric detonator	1.1 kJ
Ignitor (CCR)	0.31 "
Ignitor (SLB)	0.15 "
Fuse head	1.4 J

* PETN/Paraffin (80/20)

** PETN/Inert (50/50)

爆発の脈動周期のデータ⁴⁾から計算すると $Y=2.0$ kJ/g が得られ、上の結果と一致する。PSB は PETN に不活性なグラスパールを等量に混合したもの⁵⁾で、これらのエネルギーがちょうど PETN の半分に出ているのは妥当である。鉛トリシネートの値が小さいのは、ガスを生じない Pb の割合が大きいためであろう。

二種類の導爆線は、どちらも第 2 種である。点火管は、どちらもコンクリート破砕器用のものである。

4. 水槽壁の影響

有限な水槽内の爆発ガス球の挙動が、無限水中のそれと異なるのは、一つには器壁（側壁および底）の存在であり、他は自由水面の存在である。水中での爆発ガス球の膨脹は周囲の水を排除することになるが、その場合の水の流れは、無限水中では放射状の直線を描くべきなのに対し、器壁が存在するときの流線は壁に沿って曲らなければならない。つまり剛体壁の近くでは、壁に垂直な流れの成分はありえない。一方逆に自由水面の近くでは、水面に垂直な流れの方が起きやすい。

水槽の壁や水面が、爆発ガス球の挙動に与える影響の一つとして、R. H. Cole⁶⁾ はガス球が剛体壁に引き寄せられ、水面からは遠ざかることを述べている。彼はこの現象をガス球の脈動と関連付けて説明している。

例えば Fig. 5 (a) で剛体壁附近のガス球が、点線の位置まで膨脹したとする。(b) の収縮過程では、周囲から一様に水が戻るのではなく、壁の側から曲った流線をたどるより、壁の無い側の方が戻りやすい。その結果、収縮時のガス球の中心は、膨脹以前より壁に近寄ることになる。水面近くでの脈動の際は、逆に水面側の水が自由に動けるので、収縮時にはそちらから余計に水が流れ込み、ガス球の中心は水面から遠ざかる方へ動く。

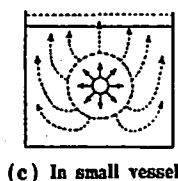
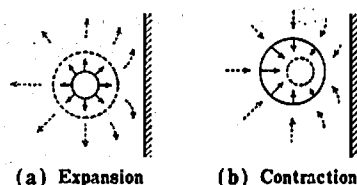


Fig. 5 Bubble pulsation near the wall (a) (b), and in small vessel (c).

これを水槽の底と自由水面の関係にあてはめれば、ガス球は底に吸い寄せられ、水面からは遠ざかるので、常に底に向かって沈下することになる。この傾向は爆心が底に近いほど、まれは水面に近いほど著しい。そして水槽の容積に比してガス球が無視できぬほど大きいときには、Fig. 5 (c) のように水面の上昇も無視できぬことになり、これがガス球の沈下を一層加速するであろう。

Fig. 3 で、爆心の深いところと浅いところで Y が小さく出る傾向は、上のことと関係がありそうである。つまりガス球の沈下があればその分だけ静水圧 p_0 は高くなるのに、 Y を求めるとき(2)式には、最初の装薬水深での値を用いているからである。

水槽の側壁の存在は、爆心が中心軸上にあるときは、ガス球を引き寄せる効果についてはキャンセルされるであろう。しかしあまりにも直径の小さい水槽中での爆発ガス球は、膨脹収縮のどちらの過程でも水の流れが阻害される。その結果脈動周期 T_B は、無限水中に比して長くなることが予想される。これを実験でたしかめた例を Fig. 6 に示す。

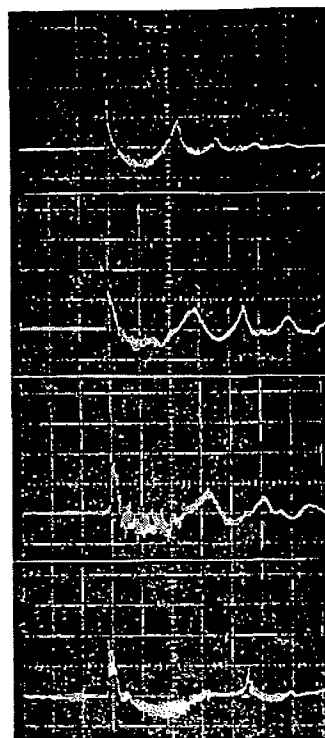


Fig. 6 Effect of wall diameter to bubble pulsation period (example by fusehead explosive). The diameter, from upper to lower, is infinite, 10, 7.5 and 6.3 cm. Time scale, 1msec/div.

いろいろな直径の水槽を使う代りに、水槽の中にいろいろな直径のパイプを立て、その中で点火玉を爆発させたときのガス球脈動周期をピエゾゲージで測定した。広い水中で点火玉の T_B を測定すると、若干のばらつきが認められたが 2.2~2.5msec の範囲にあった。それに対してパイプ中の T_B は、Fig. 6 のように径の小さいものほど長くなった。図は上から、無限水中、直径 10cm、7.5cm および 6.3cm の場合である。

図で無限水中の場合の圧力波形では、第 1 波の後、ガス球が膨脹して圧力が減じて静水圧以下になり、次いで収縮して圧力の上昇する過程までが円滑に行われている。パイプの径が細くなると、膨脹収縮の過程で水流が妨げられ、圧力変化がスムーズに行われなために脈動周期が伸びているのが見られる。

上の実験から、周囲の壁で水流が拘束されるような条件では、 T_B は無限水中の値より大きくなることがわかる。従ってこのような条件で測定された T_B を使って(2)式の Y を計算すれば、エネルギーは真の値より大きくなる。先の Fig. 4 の小水槽の例で、TNT 10g 以上の爆発で Y が大きい方へずれたのは、こうした側壁の効果のためと思われる。

水槽の側壁がガス球脈動に伴う水流に影響するか否かは、ガス球半径と水槽の半径の比が、一つの目安となる。無限水中でのガス球最大半径 a_m は、前報に述べたように T_B から計算できる。TNT 10g の a_m は約 35cm であるが、これは小水槽の半径の 40% 弱である。点火玉の a_m は約 1.5cm であり、直径 7.5cm のパイプ中での爆発が、同じ 40% の半径比にあたる。

以上の結果から、水槽壁の形状が(2)式の Y に及ぼす効果には、 Y を小さくするものと大きくするものの 2 種類があることになる。前者は自由水面と底の効果で、従って水槽の深さに関係し、後者は側壁の効果で、円筒形水槽では直径に関係する。ある水槽で薬量を増して行きながら Y を測定し、許容値以上の薬量で Y がどちらへずれるかは、深さの効果と直径の効果の、どちらが先に影響するかによるのであろう。

5. ガス球の沈下

先にガス球の沈下現象を脈動と結びつけて説明し、それが水槽の底、または自由水面の近くで起ることを述べた。この現象は、実験室内でも観察することができる。例えば、水を満たしたガラス管の中で点火玉を発火させると、発生したガス気泡はほとんど瞬間的に水底まで達し、その後ゆっくりと浮上する。Fig. 7 にその実験結果を示した。

これは内径 5cm のメスシリンダーに深さ 25cm まで水を入れ、いろいろな深さ D で点火玉を発火させたときの、気泡の沈下距離 D' を測ったものである。

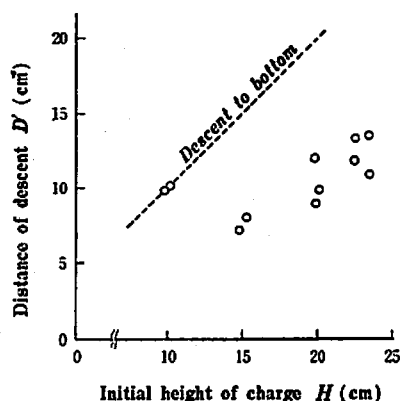


Fig. 7 Descent of gas bubble in a cylindrical vessel of small diameter (5cm), by fusehead explosive.

図は横軸に、装薬位置の高さ $H=25-D$ をとっており、破線が底までの距離を示している。この場合気泡の動きが急速なので、次のような観測を行った。暗室内で上から光をあて、横からシャッター開放でメスシリンダー内部を写真撮影する。そして光源が直接レンズに入らないようにすると、シリンダー内部は暗黒で、気泡があれば表面で反射した光だけが見られる。これにより気泡がどの深さまで動いたかがわかる。

Fig. 7 の結果によれば、 $H < 10\text{cm}$ のときのガス気泡は全部底まで達している。これより高い装薬位置からは水底に達しないが、それでも 10cm 以上の沈下が見られる。ここで装薬が水面に近いほど沈下が大きいという傾向も、たしかに見られるが、この場合は深さにかかわらずある距離だけの沈下が保障されているようにみえる。

細長い容器の中の水で爆発では、ガス球の膨脹で排除された水は水面の高さを持ち上げることになる。そして収縮時の水は上からだけしか補給されないの、脈動によるガス球の沈下は起りやすく、この傾向は断面積の小さい容器ほど著しいであろう (Fig. 5(c) 参照)。

Fig. 1 の水槽においても、水が汚れていなければ、上から眺めて爆発時のガス球沈下が認められる。しかし、沈下距離の直接測定は困難である。そこで一応数値的データを得るため、爆発が起ってからガス球が水面まで浮上するまでの時間 T_f を測定してみた。 T_f は数 sec のオーダーになるので、計時にはストップウォッチを使った。浮上するガス球は水面で見ていると、大きな泡のまわりに小さな泡をいくつか伴っている。ここで T_f の計測は最も大きい泡について行った。

一般に水中での気泡の上昇速度 $U(\text{cm/sec})$ は、容積を $V(\text{cm}^3)$ としたとき、実験的に、

$$U = 24.8 V^{1/6} \quad (5)$$

の一定速度になることが知られている⁹⁾。従って水深 D の位置から出発した気泡の、浮上に要する時間 T_f は、

$$T_f = D/U \quad (6)$$

を満足することになる。一定速度になるまでの気泡は、浮力による加速度を受けるが、その期間は短い。例えば $U=1\text{m/sec}$ に達する時間は $U/g \approx 0.1\text{sec}$ である。爆発ガス球の場合、沈下がなければ(6)式の D は装薬水深そのものと考えてよいであろう。沈下があればその分だけ T_f は大きくなるはずである。

大水槽と小水槽についてこれを行った結果を、Fig. 8, Fig. 9 に示した。

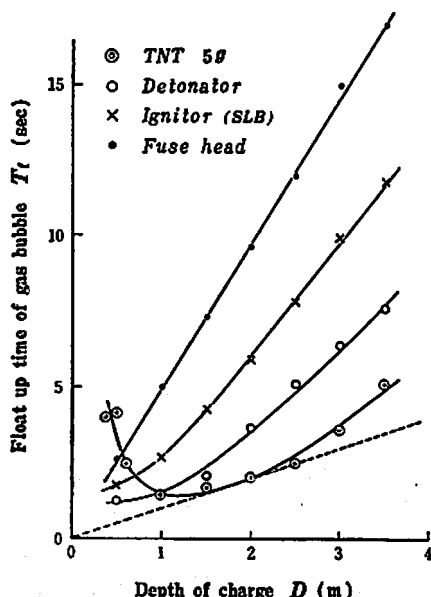


Fig. 8 Float up time of gas bubble in the large vessel.

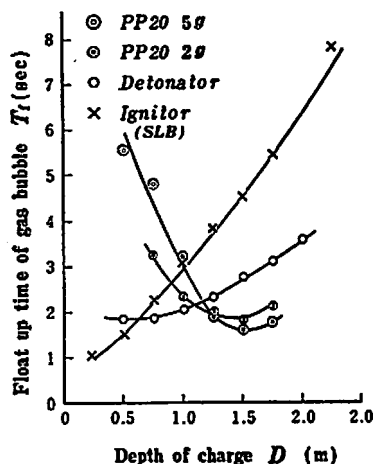


Fig. 9 Float up time of gas bubble in the small vessel.

Fig. 8 でエネルギーの最も小さい点火玉では、 T_f と D はほとんど直線関係にあり、(6)式を満足している。しかしエネルギーの大きい爆薬になると、水深の浅いところと深いところで T_f が大きくなり、ガス球の沈下のあることを示している。図で下の点線は、TNT 5g から発生するガス容積を、標準状態で 3000cm^3 として⁹⁾、(4)式により $U=94.2\text{cm/sec}$ を求め、(6)式に対応する直線を引いたものである。これから TNT 5g では、装薬水深が 2m のところではほとんど沈下していないが、これより浅くても深くても、ガス球の沈下があったことになる。

この現象は断面積の小さい水槽ほど著しいことは、小水槽による Fig. 9 から明らかである。ここでは爆薬についてはもちろん、電気雷管のみの爆発でも(6)式の直線関係からかなりずれている。エネルギーの大きい爆薬で、水深の深いときより浅いときの方が T_f が大きいのは、ガス球が大きくなると、沈下の過程にもある程度の時間がかかるためと思われる。

6. 結論

水中爆発のガス球脈動周期から、爆薬のガスエネルギーを求める方法に関して、これを円筒形の水槽中で行ったときの水槽の形状効果を調べた。水槽中での爆発が無限水中と異なるのは、壁面の存在がガス球脈動のときの水の流れを拘束することにある。水槽の深さと側壁が、エネルギー測定に与える影響として、次のようなことがわかった。

装薬が水面または底に近いと、エネルギーが小さく出る傾向があった。従って装薬水深は、水槽の深さの $1/2$ 附近にとるのが望ましいが、正しいエネルギー値を与える装薬水深の範囲は、供試爆薬のエネルギーが大きくなるにつれて狭くなった。一方、同じ装薬を直径の異なる容器中で爆発させた結果では、直径の小さい方が脈動周期が(従って計算上のエネルギーも)大きく出る傾向があった。

従ってある大きさの円筒形水槽内でエネルギー測定を行った場合、供試爆薬のエネルギー(薬量)が大きくなると、深さの効果、または側壁の効果の何れかが現れて測定値は無限水中での値からずれを生ずるようになる。

直径 1.8m、深さ 2.4m の水槽では、TNT 10g 以上のエネルギーを持つ爆薬は、エネルギーを大きく与える傾向を示した。直径、深さ、ともに 4m の水槽では、高性能爆薬 30g まで、エネルギーが薬量に比例する結果が得られた。

水槽中での爆発ガス球の挙動が、無限水中と異なる様相を示す例の一つとして、ガス球が底に向かって急激に沈下する現象を観測した。これは、装薬が底または水

面に近いほど著しく、沈下量は意外に大きい。ガスエネルギーの測定では、一応正規の値を与えるような条件でも、ガス球の沈下に関しては無限水中の挙動から、かなりのいづれが検出された。

7. 謝 辞

本研究について、実験を手伝っていただいた法政大学工学部学生、相沢哲、下山英治、柱山瑞昭の諸氏、およびガス球の浮上速度について示唆をいただいた興亜化工株式会社、清水武夫博士に厚くお礼申し上げます。

文 献

1) R. H. Cole, "Underwater Explosions", Dover

Publ. Inc. (1965)

2) 田中一三他, 工火誌, 36, 76 (1975)

3) 田中一三, 工火誌, 36, 11 (1975)

4) J. P. Slifko, NOLTR 67-87 (1967)

5) D. E. Weston, Proc. Roy. Soc. B 76, 233 (1960)

6) 田中克巳他, 工業火薬協会春季発表会 (1972)

7) G. Bjarnholt, R. Holmberg, 6th Symp. on Detonation, p. 442 (1976)

8) R. M. Davis, G. Taylor, Proc. Roy. Soc. A 200, 375 (1950)

9) 工業火薬協会編, 「発破ハンドブック」, 山海堂 (1976)

Behavior of gas bubble in underwater explosion (II)

Effect of vessel walls and the descent of gas bubble

by Kazumi Tanaka*

To obtain the gas energy of explosives, the estimation from the pulsation period of gas bubble in underwater explosion has become of major interest. In this report, the effect of vessel walls, which restricts the water flow of pulsation, was studied in cylindrical water vessels. Experimental results showed that the obtained energy became smaller or larger than the ideal value, if the depth or the diameter of vessel had not been enough. In addition, the vertical descent of gas bubble was clearly observed, as the evidence of nonideal water flow.

(*National Chemical Laboratory for Industry, Hiratsuka branch, 1-3-4, Nishiyahata, Hiratsuka-shi.)